

# Representação de objectos móveis em sistemas de informação geográfica

*Moreira, José e Ribeiro, Cristina*

## **Resumo**

*Os sistemas de informação geográfica (SIG) foram originalmente desenvolvidos para representar um estado único de uma dada realidade. No entanto, é cada vez maior o número de sistemas para os quais o tratamento de informação geográfica que varia ao longo do tempo é essencial. Estes sistemas são designados por espaço-temporais e, neste contexto, existe uma classe que tem assumido particular relevância: a representação de objectos móveis em SIG.*

*Nesta comunicação, são levantados alguns problemas que se colocam à representação da natureza contínua do movimento dos objectos em SIG. São abordadas soluções possíveis do ponto de vista do modelo de representação física de dados e das operações que deverão ser integradas num SIG de forma a que estes sejam capazes de responder a questões sobre o comportamento espaço-temporal dos objectos. A comunicação termina com uma abordagem às potencialidades disponibilizadas pelos SGBD relacional-objecto actuais, para a implementação das soluções propostas.*

**PALAVRAS-CHAVE:** Objectos móveis, modelo de dados, linguagem de interrogação, sistemas de gestão de bases de dados relacionais-objecto.

## **INTRODUÇÃO**

Durante anos, a investigação em bases de dados espaciais foi essencialmente dedicada ao desenvolvimento de modelos de dados espaciais, métodos de acesso eficientes e algoritmos para implementação de operações espaciais complexas. Estes sistemas foram desenvolvidos para capturar uma imagem única da realidade e, quando é feita uma actualização de dados, os dados anteriores são substituídos pelos novos. No entanto, normalmente a informação espacial apresenta um carácter evolutivo que importa considerar. Isto significa que, para além de actualizar permanentemente a informação espacial de forma a que esta represente o estado mais recente dos objectos reais, a sua evolução ao longo de tempo também deve ser armazenada. Assim sendo, estes sistemas requerem funcionalidades para o tratamento de dados espaço-temporais que permitam responder a questões do tipo “onde e quando”, tais como: Quais as áreas atingidas por fogos florestais entre Janeiro de 1998 e Dezembro de 1999? Quais os barcos que se encontravam a uma distância inferior a 20 milhas do porto de Leixões às 10h00 do dia 19 de Junho de 2002?

Um campo particularmente interessante neste domínio refere-se à categoria dos objectos móveis para os quais o tamanho e a forma não é relevante, tendo em atenção a escala do espaço em que eles se movimentam. Nestas condições, apenas a localização do objecto num determinado instante tem relevância. Sistemas envolvendo a posição de automóveis, embarcações, aviões ou animais, para controlo de tráfego, monitorização e controlo das actividades de pesca ou protecção de espécies animais, são exemplos representativos de aplicações neste contexto. Estes sistemas são relativamente mais simples que sistemas espaço-temporais genéricos, com capacidade para lidar com a evolução temporal de uma variedade de tipos heterogéneos de objectos espaciais, e será de esperar que possam ser disponibilizados para utilização num futuro relativamente próximo. Notar que a utilização de terminais móveis tem-se expandido rapidamente e muitos destes terminais poderão vir a ser equipados com dispositivos GPS, assumindo desta forma o papel de potenciais fontes de informação geo-referenciada facilmente transmissível a centros de informação.

Esta comunicação centra-se nas questões postas pela representação do movimento dos objectos em SIG e apresenta soluções para a sua implantação num sistema de gestão de bases de dados relacional-objecto. Inicialmente será feita uma caracterização dos sistemas espaço-temporais em geral. De seguida, é apresentado um modelo para representação física dos dados sobre o movimento dos objectos e um conjunto de operações que permitam responder a questões sobre o comportamento espaço-temporal desses objectos. Finalmente, são apresentados exemplos ilustrando a forma como as propostas apresentadas poderão ser integradas num sistema de gestão de bases de dados relacional-objecto.

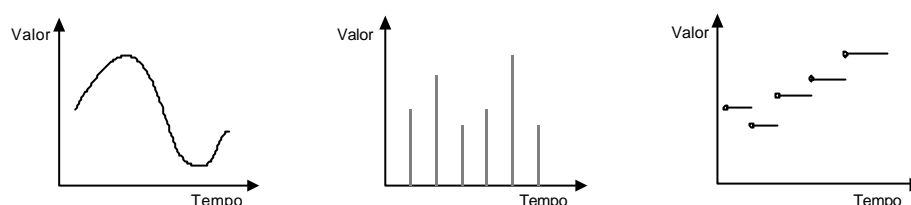
## **BASES DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAIS**

Uma base de dados espaço-temporal é uma base de dados que permite a representação, manipulação e interrogação de dados numéricos e dados espaciais que podem evoluir ao longo do tempo. Os domínios de aplicação são vastos, podendo abranger áreas tão diversas como as ciências da terra, os estudos económicos e socio-económicos, planeamento urbano, controlo de tráfego, protecção ambiental ou tratamento de imagens médicas.

Em [7] foi proposta uma classificação dos sistemas espaço-temporais baseada nas propriedades dos objectos que devem representar, considerando dois eixos principais: as propriedades espaciais dos objectos que podem ser alteradas ao longo do tempo e a forma como essas alterações podem ocorrer.

As alterações nas propriedades espaciais são resultantes do movimento ou da mutação dos objectos. O movimento é capturado a partir da evolução da localização e da direcção dos objectos ao longo do tempo. A mutação resulta de alterações no tamanho (expansão ou contracção) e na forma (deformação) dos objectos. Nos casos mais complexos, a mutação pode envolver a agregação e a fragmentação de objectos complexos, tais como objectos compostos por outros objectos elementares. Nestes casos pode ser necessário considerar as relações funcionais entre os objectos, de forma a ser possível responder a questões sobre a troca de componentes entre objectos complexos.

Estas alterações podem ocorrer de forma contínua ou descontínua ao longo do tempo. Quando as mudanças são contínuas, os valores das propriedades espaciais podem ser modelados como uma função do tempo representada por uma linha contínua (Figura 1.a). Quando os valores das propriedades espaciais mudam de um valor para outro num determinado instante as mudanças são descontínuas. Podem ocorrer duas situações distintas, designadas por registo de eventos e mudança de estado. O registo de um evento permite guardar o valor de uma propriedade espacial num dado instante (Figura 1.b). Entre eventos consecutivos, os valores são considerados indefinidos ou é-lhes atribuído um valor convencional. Uma mudança de estado, também é causada por um evento, mas, entre dois eventos consecutivos, é definido um intervalo de tempo para o qual os valores das propriedades espaciais são considerados constantes (Figura 1.c).



**Figura 1. Mudança contínua (a), registo de eventos (b) e mudança de estado (c)**

A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de aplicações com diferentes níveis de complexidade. Por exemplo, existem aplicações para o tratamento de objectos móveis em que somente as propriedades relacionadas com o movimento dos objectos são relevantes. Um outro exemplo poderá ser um sistema desenhado para monitorar a deformação – alterações no tamanho e na forma – de uma ilha devido às marés, em que propriedades como a localização e a direcção não são susceptíveis de ser consideradas. Finalmente, num sistema histórico para o estudo de fenómenos migratórios de populações, interessará registar não só o movimento das populações mas também as alterações nos territórios ocupados durante um período histórico, e até considerar a possibilidade de agregação e fragmentação, de populações ou territórios.

	Mudança contínua		Mudança descontínua
	Objectos móveis	Ilha	Migração de populações
Movimento	√		√
Mutação			
Deformação simples		√	√
Agregação e fragmentação			√

**Tabela 1. Exemplo de classificação de aplicações espaço-temporais**

É importante notar que a escolha entre mudança contínua e mudança descontínua pode ser determinada quer pela natureza do sistema e dos dados a serem modelados, quer pela possibilidade prática de capturar dados com rigor suficiente. Este tipo de decisões devem ser tomadas na fase de modelação do sistema. Além disso, diferentes níveis de pormenor podem envolver diferentes requisitos de registo de dados. Por exemplo, no Verão, os serviços nacionais de protecção civil nacionais podem estar interessados em representar o número, a localização e a extensão dos incêndios e de actualizar esta informação de três em três horas. No entanto, as autoridades locais e as próprias corporações de bombeiros, estarão interessadas em informações mais pormenorizadas que permitam ajudar a isolar os focos de incêndio e a evitar o seu alastramento a outras áreas. Provavelmente, esta informação também deve ser actualizada mais frequentemente.

Actualmente, o desafio que se coloca aos investigadores em bases de dados espaço-temporais, consiste em encontrar abstrações e arquitecturas para a implementação de sistemas genéricos que possam ser adaptados aos requisitos específicos de diversos domínios de aplicação. Todos os conceitos do domínio das bases de dados espaciais e temporais devem ser considerados. No entanto uma combinação simples dos aspectos espaciais e temporais dos dados não é suficiente para abarcar todas as novas questões levantadas pela integração da informação espaço-temporal em bases de dados. Alguns tópicos de investigação importantes neste contexto consistem na definição de representações e modelos de dados espaço-temporais, de linguagens de interrogação, interfaces com o utilizador, estruturas de armazenamento de dados e métodos de indexação, ou de arquitecturas para bases de dados espaço-temporais.

## OBJECTOS MÓVEIS

Um campo que tem assumido particular relevância no domínio das bases de dados espaço-temporais consiste na representação de objectos móveis que, tendo em atenção a extensão geográfica do espaço em que se movimentam, podem ser modelados como pontos móveis. Existem duas grandes classes de aplicações neste contexto: os sistemas de tempo real, que operam sobre a antecipação de acontecimentos no futuro próximo a partir do conhecimento mais recente sobre o comportamento das entidades do mundo real [10]; e os sistemas de monitorização, que consideram a história do comportamento espaço-temporal dessas entidades[6]. Questões como “Quais são os hospitais mais próximos de um veículo” ou “Quais são as embarcações que poderão entrar numa área restrita nos próximos 20 minutos” são exemplos típicos num sistema de tempo real. O objecto deste trabalho são os sistemas de monitorização e dedicaremos uma atenção especial às questões que se colocarão neste tipo de sistemas.

Os objectos móveis podem ser caracterizados de acordo com diferentes propriedades. Considerando o movimento dos objectos, é possível distinguir entre objectos com trajectória livre e objectos com trajectória condicionada. Trajectória livre significa que existem poucas ou até nenhuma restrições ao movimento dos objectos no espaço, como é o caso do movimento de um navio no oceano. Trajectória condicionada, significa que existem fortes restrições ao movimento de um objecto, como é o caso do movimento de um comboio, em que a complexidade do problema pode ser reduzida à representação do movimento de um objecto num espaço unidimensional.

Um outro aspecto que caracteriza os objectos móveis é o método de aquisição de dados. Existem sistemas orientados a eventos, onde se pode assumir que é possível detectar automaticamente alterações na velocidade e direcção de um objecto móvel, e sistemas de monitorização, tais como os baseados em GPS, que capturam dados sobre a localização dos objectos em determinados instantes de tempo. Neste caso, as observações podem ser sincronizadas, se todos os objectos forem observados nos mesmos instantes de tempo, ou independentes no caso contrário.

Esta comunicação centra-se na representação de objectos móveis com trajectória livre em que as observações podem ser sincronizadas ou independentes. O seu caso de estudo é o sistema de monitorização e controlo das actividades de pesca (MONICAP) desenvolvido pelo Centro de Comunicações móveis e Pessoais do INESC-Lisboa e em utilização pela Inspeção Geral de Pesca desde 1992 [4]. Trata-se de um sistema que permite vigiar a localização, direcção e velocidade dos barcos em que foi instalada uma caixa MONICAP a partir de um centro de controlo terrestre. O sistema utiliza o GPS para determinar a localização dos barcos e o sistema de satélites Inmarsat C para a comunicação entre os barcos e o centro de controlo terrestre.

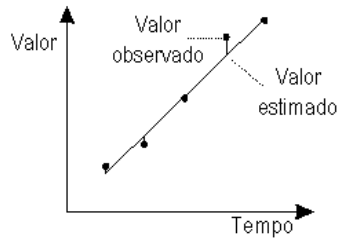
Nestas condições, um objecto móvel é susceptível de mudar de localização a cada instante. Mas, uma vez que os sistemas computacionais não são capazes de armazenar ou processar conjuntos infinitos, a representação do movimento de um objecto não é um problema trivial. A solução evidente consistiria em efectuar actualizações tão frequentes quanto possível. No entanto, uma representação discreta não seria satisfatória para numerosas aplicações, uma vez que importaria limitações de precisão indesejáveis e a sobrecarga dos sistemas para o tratamento de conjuntos de dados volumosos seria inaceitável.

A solução proposta consiste na decomposição do movimento de um objecto num conjunto finito de secções de movimento [7]. A informação é capturada sob a forma de sequências de observações (*oid*, *ot*, *ol*), em que cada observação representa a localização (*ol*), num determinado instante (*ot*) de um certo objecto (*oid*). As sequências de observações são transformadas em sequências de secções de movimento representadas por fórmulas analíticas do movimento. Cada secção de movimento consiste num tuplo (*pid*, *ti*, *tf*, *l*, *v*), em que *pid* denota a identificação do objecto, [*ti*, *tf*] representa o intervalo de validade temporal da função de variabilidade *v*, e *l* é um valor n-dimensional correspondendo à localização do objecto no instante *ti*. Uma função de variabilidade é uma função do tempo que permite representar a mudança de localização de um objecto ao longo do tempo. Na solução adoptada, a função de variabilidade poderá resumir-se a um único parâmetro de velocidade, representado por um valor n-dimensional.

Aproveitando o facto de o movimento da maior parte dos objectos do mundo real ser regular, uma sequência de observações para as quais a velocidade é aproximadamente constante pode ser agregada numa única secção de movimento, utilizando uma função de aproximação linear (Equação 1) para cada dimensão espacial considerada.

$$\tilde{l} = \bar{l} + v \times (t - \bar{t}) \quad (1)$$

Esta equação representa a linha de regressão de *l* sobre *t* que minimiza a soma dos quadrados dos desvios dos valores observados à linha segundo um dos eixos coordenados. A variável  $\tilde{l}$  designa o valor estimado para cada instante correspondente *t*. A fórmula (*ol* -  $\tilde{l}$ ), em que *l* denota o valor estimado para o instante *ot* segundo um dos eixos coordenados, dá o erro de estimação (Figura 2).



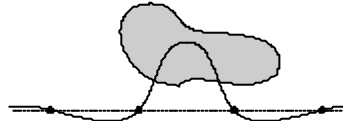
**Figura 2. Aproximação linear do movimento de um objecto**

As variáveis  $\bar{l}$  e  $\bar{t}$  representam respectivamente as médias de  $ol$  e  $ot$ , para  $n$  valores observados. A velocidade  $v$  segundo um dos eixos coordenados é dada pela Equação 2.

$$v = \frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l}) \times (t_j - \bar{t})}{\sum_{j=1}^n (t_j - \bar{t})^2} \quad (2)$$

Qualquer valor  $l'$  associado a um instante  $t'$  pertencente ao intervalo  $[ti, tf]$  pode ser calculado através da Equação 1. Cada observação  $j$  compreendida numa secção de movimento deverá verificar a fórmula  $\Delta l_j = |l_j - \tilde{l}_j| \leq x$ , em que  $x$  é uma precisão espacial definida pelo utilizador. Quando existe uma nova observação, as fórmulas são recalculadas e, se a agregação da nova observação originar um valor  $\Delta l_j > x$ , a secção de movimento corrente é fechada e é criada uma nova secção de movimento. Esta estratégia permite a redução do número de secções de movimento necessárias à representação do movimento de um objecto. Desta forma, existe uma redução do espaço em memória necessário e uma melhoria da performance das operações sobre o movimento.

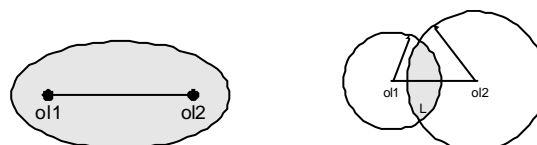
Os sistemas de observações, por exemplo os baseados em GPS, só são capazes de capturar informação em pontos discretos no tempo, e por isso, o comportamento dos objectos entre duas observações consecutivas é desconhecido. Por exemplo, considerando que ocorreu uma descarga de resíduos tóxicos no mar, as autoridades estariam certamente interessadas em conhecer quais os navios que passaram na área poluída durante um determinado período de tempo. Vamos supor que o navio responsável pela descarga seguiu a trajectória representada pela linha contínua da Figura 3. Os pontos a negro representam as observações efectuadas durante o intervalo de tempo considerado, a região a sombreado representa a área poluída e a linha a tracejado representa a trajectória estimada a partir das observações.



**Figura 3. Indeterminação do movimento de um objecto**

A linha a tracejado não intersecta a região a sombreado e, por consequência, uma resposta à pergunta das autoridades baseada nesta estimacão da trajectória não incluiria o navio culpado. Por outro lado, também é possível que a resposta incluía falsos candidatos para os quais a trajectória estimada intersecta a área poluída embora na realidade não tenham lá estado. Desta forma, a resposta a este tipo de questões resulta num conjunto de possíveis candidatos, podendo incluir elementos que na realidade não correspondem aos critérios especificados e omitir outros que na realidade verificariam esses critérios.

Tendo em atenção que existem restrições físicas ao movimento dos objectos no mundo real, é possível estabelecer limites para a incerteza na localização de um objecto [5,7,8]. Em particular, conhecendo a velocidade máxima de deslocamento de um objecto, é possível garantir que o conjunto de todas as localizações em que um objecto pôde estar durante um intervalo de tempo definido entre duas observações consecutivas corresponde a uma elipse (FIGURA 4.a), e que o conjunto de todas as localizações possíveis para um objecto num determinado instante pode ser definido a partir da intersecção de dois círculos (FIGURA 4.b). Como veremos adiante, estas propriedades permitem a definição de semânticas que permitem dar respostas fidedignas às questões dos utilizadores.



**Figura 4. Incerteza na localização de um objecto: num intervalo de tempo definido entre duas observações (a) e num instante entre duas observações (b)**

Para introduzir as operações sobre o movimento é importante definir os conjuntos de valores possíveis associados aos diferentes tipos de dados que devem ser tratados no sistema. Assim, assumir-se-á a existência de um conjunto infinito de constantes  $D$ , composto pelos seguintes subconjuntos:  $N = \{n_1, n_2, \dots\}$  como constantes numéricas para inteiros e reais;  $T = \{t_1, t_2, \dots\}$  como constantes temporais para instantes e para intervalos de tempo; e  $G = \{g_1, g_2, \dots\}$  como constantes geográficas para pontos, linhas e polígonos. O movimento de um objecto é definido como um conjunto infinito de elementos de  $T \times G$ . Um valor do tipo movimento é uma representação finita de um movimento tal como apresentado anteriormente.  $Mvt = \{m_1, m_2, \dots\}$  denota o conjunto de valores possíveis para o movimento dos objectos. Notar que os valores temporais e espaciais são representados explicitamente no movimento. Valores numéricos, como a velocidade e a orientação, são implícitos, e podem ser inferidos a partir dos primeiros. Outros tipos de valores, como as *strings*, são irrelevantes para as operações sobre o movimento. As operações podem ser classificadas em três categorias: projecção, restrição e métrica (Tabela 2) [5].

Projecção	Temporal	<i>temporalProjection;</i>
	Espacial	<i>spatialPathProjection; spatialLensProjection;</i>
	Numérica	<i>speed; orientation</i>
Restrição	Temporal	<i>before; during; after; at;</i>
	Espacial	<i>in; touch; disjoint; north; south; east; west; withinDistance</i>
	Numérica	<i>speedBetween; orientationBetween;</i>
	Topológico-temporal	<i>enter; leave; cross;</i>
Métrica		<i>distance</i>

**Tabela 2. Operações sobre movimento**

As projecções são operações do tipo  $d: Mvt @ D$ , usadas para extrair as componentes espacial ou temporal, ou calcular quantidades numéricas associadas ao movimento. Uma projecção temporal (*temporalProjection*) permite obter a cobertura temporal de um movimento, composta por instantes e intervalos de tempo. Uma projecção espacial (*spatialPathProjection*) determina o caminho percorrido por um objecto. Uma projecção numérica (*speed, orientation*) permite obter a velocidade média de deslocamento ou a orientação de um objecto.

As operações de restrição permitem filtrar o movimento dos objectos de acordo com critérios temporais, espaciais ou numéricos. O resultado de uma operação de restrição consiste nas várias partes do movimento inicial que verificam o critério especificado.

Uma restrição temporal é uma função do tipo  $s: Mvt \times T @ Mvt$ , que permite obter, por exemplo, a parte do movimento ( $m \hat{I} Mvt$ ) de um objecto compreendida numa dada janela temporal ( $t \hat{I} T$ ). *Before, during* e *after*, se o elemento temporal for um intervalo, e *at*, se o elemento temporal for um instante, são exemplos de restrições temporais possíveis.

Segundo [1], as relações espaciais no contexto de um SIG podem ser agrupadas em três categorias: topológicas, direccionais e de distância. Esta classificação mantém-se para as relações espaciais entre um objecto móvel e um objecto estático e entre dois objectos móveis. A distinção é que as relações espaciais envolvendo objectos móveis são temporárias, isto é, podem ser verificadas durante apenas alguns períodos de tempo. O formato geral para as operações de restrição é  $s: Mvt \times X @ Mvt$ , para as operações topológicas (*in, touch* e *disjoint*) e de direcção (*north, south, east* e *west*), e  $s: Mvt \times X \times N @ Mvt$ , para as operações de distância (*withinDistance*). A variável  $X$  denota  $G$  ou  $Mvt$ . Por exemplo, a restrição topológica *in*, permite obter as partes do movimento ( $m \hat{I} Mvt$ ) em que o objecto esteve dentro de uma região representada por um polígono ( $g \hat{I} G$ ) e *withinDistance* permite obter as partes do movimento de um objecto móvel ( $m_1 \hat{I} Mvt$ ) em que esteve a uma distância inferior a um determinado valor ( $n \hat{I} N$ ) de um outro objecto móvel ( $m_2 \hat{I} Mvt$ ).

Uma restrição numérica é uma função do tipo  $s: Mvt \times N \times N @ Mvt$ , que permite seleccionar as partes do movimento de um objecto para os quais a velocidade ou o ângulo (*speedBetween* e *orientationBetween*, respectivamente) estão compreendidos entre dois valores numéricos.

Num contexto de um sistema para representação de objectos móveis surge uma nova categoria de relações topológicas, que se verificam ou não dependendo do seu comportamento anterior e posterior a um determinado período de tempo. Estas operações são funções do tipo  $s: Mvt \times X @ Mvt$ , em que  $X$  denota  $G$  ou  $Mvt$ , e podem ser designadas por topológico-temporais. *Enter, leave* e *cross* são exemplos representativos. Por exemplo, um objecto móvel entra numa determinada região (objecto estático), se intersecta o exterior e depois o interior desse objecto. O resultado desta operação consiste nas partes do movimento do objecto em que este esteve sobre a fronteira do objecto estático.

As operações métricas são funções do tipo  $s: Mvt \times X @ N$ , em que  $X$  denota  $G$  ou  $Mvt$ , que permitem responder a questões sobre distâncias entre objectos. Na sua forma mais simples, o resultado de uma operação (*distance*) corresponde à distância mínima entre dois objectos. Em [2] é apresentado um novo conceito, a distância móvel. A distância móvel consiste num valor numérico que varia ao longo do tempo, representando a distância entre um objecto móvel e um estático ou a distância entre dois objectos móveis, a cada instante de um determinado período de tempo. Este conceito de distância não foi aplicado no contexto do nosso trabalho.

O problema da incerteza na localização dos objectos pode ser tratado associando diferentes semânticas às operações apresentadas acima, tais como *possivelmente*, *seguramente* e *provavelmente*. Numa semântica do tipo *possivelmente*, uma operação devolve o conjunto de todos os candidatos que possam satisfazer o predicado especificado na questão. Por exemplo, se a questão for “Quais foram os objectos que estiveram numa região?”, pode-se garantir que a resposta inclui todos os objectos que estiveram nessa região, mas também pode incluir objectos que não estiveram lá. Numa semântica do tipo *seguramente*, uma operação só retorna os valores para os quais é possível assegurar que o predicado especificado na questão é verificado. Por exemplo, a resposta à questão anterior incluiria apenas objectos que garantidamente estiveram nessa região, mas podem existir objectos que também lá estiveram e não fazem parte desse resultado. Numa semântica do tipo *provavelmente*, o caso por omissão, supõe-se que existem métodos que permitem estimar a localização de um objecto a qualquer instante. O método de aproximações lineares apresentado acima é um dos exemplos possíveis. O resultado deste tipo de estimação é uma localização provável. As respostas às questões consistem em conjuntos de possíveis candidatos, podendo incluir falsos candidatos ou estarem incompletas. A combinação destas semânticas com as operações de restrição e métricas acima definidas, permite dar respostas credíveis e satisfatórias às questões dos utilizadores, como veremos adiante.

Num contexto de incerteza na localização dos objectos, torna-se útil definir uma nova operação de projecção espacial que pode ser designada por *spatialLensProjection*. Comparativamente à operação *spatialPathProjection* definida acima, que devolve uma linha representando a estimação do caminho seguido por um objecto móvel, a operação *spatialLensProjection* devolve um polígono (*lens area*) que corresponde ao conjunto de todas as localizações que poderiam ter sido atingidas pelo objecto durante o seu movimento.

## REPRESENTAÇÃO NUM SISTEMA DE GESTÃO DE BASES DE DADOS RELACIONAL-OBJECTO

Há um consenso na comunidade de investigação em bases de dados de que existem SGBD eficientes para a representação, manipulação e interrogação de grandes volumes de dados descritivos, isto é, dados numéricos, alfabéticos e alfanuméricos. Estes sistemas foram desenvolvidos para capturar uma fotografia única da realidade e não são adequados para o suporte a aplicações requerendo o tratamento de dados sobre o passado, o presente e o futuro de uma forma integrada. A comunidade de investigação em bases de dados temporais estudou este assunto e actualmente existe uma extensão temporal consensual (TSQL2), que permite a formulação de questões sofisticadas sobre a evolução dos dados ao longo do tempo, bem como a modificação de estados anteriores (se forem detectados erros ou se existir mais informação disponível) e de estados futuros (planeamento) [11]. A investigação em bases de dados espaciais foi essencialmente dedicada ao desenvolvimento de modelos de dados espaciais, e de métodos de acesso e algoritmos eficientes para a implementação de operações espaciais complexas [9]. Estes sistemas foram disponibilizados comercialmente, primeiro como SIG proprietários, como o Arc/Info da ESRI GIS & Mapping, e mais recentemente como extensões espaciais que podem ser integradas nos SGBD, como o Spatial Data Option da Oracle ou o DB2 Spatial Extender da IBM.

Importa salientar que os principais actores no domínio das bases de dados apostaram na tecnologia relacional-objecto, e hoje em dia, motores de bases de dados, como o Oracle 9i, passaram a ser designados por relacional-objecto. Estes sistemas permitem integrar capacidades do paradigma orientado a objecto nos SGBD relacionais tradicionais. Desta forma, estes sistemas permitem definir novos tipos de dados, para representar, por exemplo, objectos geográficos como pontos, linhas ou polígonos, e objectos multimédia como sons ou imagens, permitem definir operações para manipular esses novos tipos de dados, e suportam a construção métodos de acesso (indexação) eficazes a esses dados. Estas novas capacidades são integradas sob a forma de módulos, também designados por opções ou extensões, no núcleo do SGBD, passando a estar disponíveis da mesma forma e com a mesma funcionalidade dos tipos de dados e operações nativos do SGBD, usando a linguagem SQL. É possível fazer uma escolha selectiva dos módulos a integrar de forma a ajustar as capacidades do SGBD às necessidades das aplicações.

Deste modo, num sistema para a representação de objectos móveis, o tratamento de dados numéricos (conjunto *N* definido na secção anterior), alfabéticos e alfanuméricos, pode ser assegurado pelas capacidades tradicionais de um SGBD relacional. O tratamento de dados geográficos (conjunto *G*) pode ser assegurado por uma extensão para o tratamento de dados espaciais. Para o tratamento de dados temporais (conjunto *T*) poder-se-á recorrer às funcionalidades do T2SQL, se estas estiverem disponíveis, caso contrário, poder-se-á recorrer ao tipo de dados para representação de datas nos sistemas actuais, para a representação de instantes, enquanto que para a representação de intervalos de tempo será necessário definir um novo tipo de dados e operações para a sua manipulação. Finalmente, para a representação de objectos móveis, será necessário definir o tipo de dados *movement* (conjunto *Mvt*), desenvolver os algoritmos que permitam implementar as operações apresentadas anteriormente e construir métodos que permitam um acesso eficiente aos dados do tipo movimento. Estas novas funcionalidades deverão ser disponibilizadas como uma nova extensão.

Para ilustrar o exposto anteriormente, consideremos o seguinte esquema de uma base de dados de uma autoridade responsável pelo controlo das actividades de pesca, que permite representar a informação sobre os barcos de pesca (objectos móveis) e as áreas protegidas (objectos geográficos estáticos). O código SQL para criar as tabelas poderia ser:

```
CREATE TABLE areasProtegidas (  
  nome      VARCHAR2(30) NOT NULL,  
  geometria SDO_GEOMETRY NOT NULL  
  PRIMARY KEY (nome) );
```

```
CREATE TABLE barcosPesca (  
  matricula VARCHAR2(8) NOT NULL,  
  nome      VARCHAR2(30) NOT NULL,  
  viagens   MOVEMENT  
  PRIMARY KEY (matricula) );
```

Notar que a geometria da área protegida é definida recorrendo a um tipo de dados disponibilizado por uma extensão espacial e que toda a história do movimento de um barco de pesca é representada pelo tipo abstracto de dados *movement*, que deverá ser definido no módulo específico para o tratamento de objectos móveis.

As questões que se seguem permitem ilustrar a forma como poderiam ser processadas algumas das perguntas que poderiam ser colocadas pela autoridade responsável pelo controlo das pescas.

Q1. Para começar, vamos supor que se pretendia saber qual a actividade do barco de pesca “P01” desde 15 de Maio de 2002.

```
SELECT  after(barcosPesca.nome, '15-05-2002')
FROM    barcosPesca
WHERE   barcosPesca.matricula = 'P01';
```

Este comando utiliza o predicado SQL standard = para seleccionar o barco de pesca com a matrícula 'P01' e uma operação sobre o movimento desse barco, a restrição temporal *after*, para filtrar as viagens desejadas. O resultado é um valor do tipo movimento, pronto a ser utilizado, por exemplo por uma ferramenta de visualização gráfica.

Q2. Vamos agora determinar qual a localização de todos os barcos de pesca no dia 18 de Outubro de 2002 às 10h00 da manhã.

```
SELECT  x.nome, spatialPathProjection(at(x.viagens, '18-10-2002:10:00'))
FROM    barcosPesca x;
```

A localização de cada barco de pesca é determinada utilizando a restrição temporal *at*, para filtrar o movimento de acordo com o instante especificado, e aplicando a operação espacial *spatialPathProjection* sobre o valor obtido. O resultado final consiste num conjunto de registos compostos pelo nome do barco de pesca e por um ponto correspondente à sua localização no instante pretendido.

Q3. Finalmente, supondo que a autoridade que controla as pescas vai aplicar multas aos barcos que cometeram infracções, esta só o deverá fazer para os barcos para os quais é possível garantir que estiveram numa zona proibida. Assim sendo, a seguinte interrogação devolve o nome dos barcos de pesca que garantidamente estiveram na área protegida 'Costa Azul'.

```
SELECT  x.nome
FROM    barcosPesca x, areasProtegidas y
WHERE   y.nome = 'Reserva da Costa Azul'
AND     notEmpty(surely_in(x.viagens, y.geometria));
```

A restrição espacial *surely\_in* permite obter as partes do movimento para as quais é possível garantir que o barco de pesca esteve na área protegida. Notar que para a resolução deste tipo de questões é necessário recorrer a um predicado adicional, *notEmpty*, que recebe como argumento um valor do tipo movimento e devolve *verdade* se esse valor não for nulo e devolve *falso* caso contrário. Aplicando este predicado sobre o resultado de *surely\_in* é possível seleccionar os barcos de pesca pretendidos.

Em [5] é apresentado um conjunto detalhado de exemplos que permite fazer uma análise mais ampla da expressividade das propostas apresentadas nesta comunicação.

## CONCLUSÃO

Os sistemas espaço-temporais permitem representar a evolução da informação espacial ao longo do tempo. O campo de aplicação é vasto e nos últimos anos tem sido feito um esforço de investigação considerável neste domínio. O grau de complexidade das representações espaço-temporais é elevado e muito trabalho de investigação resta ainda fazer, até que possam ser disponibilizados sistemas genéricos, isto é sistemas capazes de representar a evolução ao longo do tempo de todo o tipo de informação espacial, que possam ser moldados aos requisitos específicos das diversas aplicações neste domínio. No entanto, é possível identificar classes de sistemas espaço-temporais consideravelmente mais simples que os sistemas genéricos e com grande potencial de aplicação no futuro próximo.

Nesta comunicação analisamos um desses casos, a classe dos sistemas para representação de objectos móveis que possam ser representados como pontos móveis, no âmbito dos sistemas de monitorização. São focados aspectos relacionados com o modelo de representação de dados do tipo do movimento dos objectos e aspectos relacionados com a linguagem de interrogação para dar resposta às questões dos utilizadores sobre o comportamento espaço-temporal desses objectos. São abordadas dificuldades que se colocam à representação da natureza contínua do movimento dos objectos, nomeadamente a incerteza na localização de um objecto nos intervalos de tempo entre observações, e são apresentadas soluções que permitem dar respostas satisfatórias às questões dos utilizadores. Também são apontadas direcções para a implementação das propostas num sistema de SGBD relacional-objecto. Outros tópicos, como a arquitectura dos sistemas de bases de dados espaço-temporais, a performance ou a visualização gráfica de dados estão fora do âmbito desta comunicação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração das pessoas que participaram no desenvolvimento deste trabalho, orientando, discutindo e apresentando ideias, nomeadamente Jean-Marc Saglio e Talel Abdessalem da Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris e Michel Scholl do Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris & INRIA, Rocquencourt. Agradecem ainda a José Luís e Fernando Moreira do Centro de Comunicações Móveis e Pessoais do INESC-Lisboa, e a Joaquim Antunes da Inspeção Geral de Pescas, que gentilmente disponibilizaram dados reais e informações valiosas para o nosso caso de estudo.

## REFERÊNCIAS

1. **Egenhofer, M.** *Spatial relations: Models and inferences*. In 5<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Spatial Databases, 1997.
2. **Erwig, M., Güting, R., Schneider, M. and Vazirgiannis, M.** *Spatio-temporal data types: an approach to modeling and querying moving objects in databases*. Geoinformatica, 3(3):269-296, 1999.
3. **Frank, A. et al.** *Chorochronos: a research network for spatiotemporal database systems*. SIGMOD Record, 28(3):12-21, 1999.
4. **Inesc-Lisboa, CCMP.** *MONICAP – continuous monitorization of fishing activities*. URL: [http://www.ccmp.inesc.pt/ccmp/eg/e\\_monicap.html](http://www.ccmp.inesc.pt/ccmp/eg/e_monicap.html), 2000.
5. **Moreira, J., Ribeiro, C. and Abdessalem, T.** *Query operations for moving objects database systems*. In Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACMGIS), 102-108, 2000.
6. **Moreira, J., Ribeiro, C., Saglio, J. and Scholl, M.** *Issues in spatio-temporal database systems: data models, languages and moving objects*. The encyclopedia of life support systems, UNESCO-EOLSS, 2002.
7. **Moreira, J., Saglio, J. and Ribeiro, C.** *Representation and manipulation of moving points: an extended data model for location estimation*. Journal of Cartography and Geographic Information Systems (CaGIS), ACSM, 26(2):109-123, 1999.
8. **Pfoser, D., Jensen, C.** *Capturing the uncertainty of moving-object representations*. Lecture Notes in Computer Science, 1651, 111-132, 1999.
9. **Rigaux, P., Voisard, A. and Scholl, M.** *Spatial databases: with application to GIS*. Morgan Kaufmann, 2001.
10. **Wolson, O., Sistla, P. Xu, B. and Zhou, J.** *Tracking moving objects using database technology in DOMINO*. Lecture Notes in Computer Science, 1649, 112-119, 1999.
11. **Zaniolo, C. et al.** *Advanced database systems*. Morgan Kaufmann, 1997.

**José Moreira**  
jmoreira@uport.pt

Obteve o grau de doutoramento em informática na Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Paris em regime de cotutela com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o Diploma de Estudos Aprofundados (DEA) em Sistemas Informáticos na Université Pierre et Marie Curie – Paris VI e a Licenciatura em Informática – Matemáticas Aplicadas na Universidade Portucalense. Actualmente é professor auxiliar do grupo de Engenharia de Software do Departamento de Informática da Universidade Portucalense. Os seus domínios de interesse em investigação são os sistemas espaciais e espaço-temporais. Os principais tópicos são a representação de objectos móveis em sistemas de informação geográfica e a avaliação de desempenho em bases de dados.

### Departamento de Informática da Universidade Portucalense

Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 541 – 619  
4200 – 072 Porto  
Portugal  
Tel.: 22 55 72 373  
Fax: 22 55 72 015

**Cristina Ribeiro**  
mcr@fe.up.pt

Obteve o doutoramento em Informática, especialidade de Inteligência Artificial, na Universidade Nova de Lisboa em 1993, o mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores no Instituto Superior Técnico em 1984 e a licenciatura em Engenharia Electrotécnica na FEUP em 1981. Actualmente é Professora Auxiliar no DEEC/FEUP, onde lecciona disciplinas na Secção de Informática. É investigadora do INESC Porto desde 1985. Os seus tópicos de investigação são o raciocínio temporal, programação com restrições e recuperação de informação.

### Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rua Dr. Roberto Frias s/n  
4200 – 465 Porto  
Portugal  
Tel.: 22 50 81 841  
Fax: 22 50 81 440